

DETERMINACION MEDIANTE TERMOGRAFIA DE LA REFLECTANCIA INFRARROJA DE MATERIALES ESPECULARES

M. Hongn¹, S. Flores Larsen²

Instituto de Energías no Convencionales (INENCO) – Facultad de Ciencias Exactas –Universidad Nacional de Salta–
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Avenida Bolivia 5150 - C.P. 4400 – Salta Tel. 54-387-4255424 – Fax 54-387-4255489
E-mail: marcoshongn@gmail.com

Recibido: 10/08/12; Aceptado: 24/09/12

RESUMEN: En este trabajo se presenta una metodología experimental destinada a la medición de la reflectancia especular en el rango del IR lejano, mediante la utilización de una cámara termográfica. Las medidas se realizaron para muestras especulares de dos tipos diferentes: con soporte de vidrio y reflectores metálicos. Se estudiaron espejos de distintos espesores y calidad de vidrio, vidrios claros, acrílico y una placa de aluminio. Se determinó la reflectancia infrarroja de estos materiales para distintos ángulos de incidencia (10°, 30°, 45°, 60° y 70°). Los resultados indican que la muestra de aluminio presenta los mayores valores de reflectancia (0.80 a incidencia normal), que disminuye al aumentar el ángulo de incidencia. Las cinco muestras compuestas por vidrio presentan valores de reflectancia similares entre ellas (0.15 a incidencia normal), la cual aumenta con el ángulo de incidencia.

Palabras clave: cámara termográfica, reflexión especular, termogramas.

INTRODUCCIÓN

Al interactuar con la materia, un porcentaje de la luz incidente puede ser absorbida (α), transmitida (τ) y reflejada (ρ), dependiendo de la longitud de onda de la luz (λ), del ángulo de incidencia (θ) y de las propiedades del material. En términos generales, el balance energético se escribe como $\alpha + \tau + \rho = 1$, en donde estas propiedades están evaluadas para la misma longitud de onda. Para cuerpos opacos, la transmitancia τ se considera nula. La reflectancia ρ se define como la relación entre la irradiancia (o flujo radiante) reflejada por la superficie y la incidente sobre la misma:

$$\rho = I_{ref} / I_{inc} \quad (1)$$

De acuerdo al rango en el cual se promedien los valores espectrales de la reflectancia, ésta se denomina reflectancia visible, infrarroja o solar y usualmente el valor de la bibliografía se da a incidencia normal. La reflectancia depende de λ y del ángulo θ entre el haz incidente y la normal de la superficie. ρ es una propiedad del material y su distribución es una característica de cuán plana sea la superficie a nivel microscópico. La radiación reflejada por una superficie contiene un componente especular y un componente difuso. Hablamos de especularidad cuando un haz de rayos paralelos es reflejado por una superficie como un haz de rayos paralelos, según la ley de reflexión. A nivel atómico, no existe en la realidad una superficie perfectamente lisa, por lo que la reflexión especular contiene siempre un pequeño grado de dispersión. Para superficies muy lisas, el resultado del efecto de la dispersión es un ligero ensanchamiento del haz cónico de luz que se refleja en la dirección especular (SolarPACES, 2011). El presente trabajo describe un método de medición de la reflectancia de materiales especulares en el rango infrarrojo comprendido entre 8 μm y 14 μm utilizando una cámara termográfica. El estudio de ρ para este tipo de materiales es importante para determinar el comportamiento de sus parámetros óptico-radiativos en el rango IR. Al ser la termografía un método no destructivo para la medida de temperatura de superficies, es necesario conocer parámetros como la emisividad IR de la muestra en cuestión y también es conveniente conocer acerca de las posibles fuentes de error en la medida, provenientes por reflexión en superficies circundantes. Además, en conjunto con un estudio de reflectancia en el rango solar, permite obtener una caracterización de este parámetro en gran parte del espectro de longitudes de onda.

Dichas cámaras cuentan con una matriz de sensores que trabajan mediante la detección de energía radiante, generalmente sobre un rango restringido de longitudes de onda, emitida por el objeto de interés y a través de la ley de radiación de Planck entregan valores de temperaturas calculados indirectamente con la radiación medida. Un sistema óptico, similar al de las cámaras comunes, permite enfocar la energía sobre el detector y para seleccionar el rango de longitudes de onda deseado se utiliza un filtro. La cámara transforma esta energía térmica en una imagen visible, en donde cada nivel de energía se representa mediante un color o nivel de gris.

¹ Becario doctoral de CONICET

² Investigador adjunto de CONICET

La tecnología más utilizada actualmente en las cámaras termográficas es la de array de microbolómetros no refrigerados. El estado del arte actual de los microbolómetros está basado en materiales policristalinos o amorfos, típicamente óxido de vanadio (VOx) o silicio amorfo (a-Si) (Rogalski, 2011). Estos sensores producen una señal eléctrica medible S_{med} (voltajes, corrientes, número de cuentas, etc.) que es proporcional a la radiación recibida por el sensor.

Para objetos opacos, la señal eléctrica S_{med} incluye el aporte proveniente de tres fuentes: la radiación emitida por la muestra, la radiación del entorno que es reflejada por la muestra, y la radiación emitida por el mismo aire ambiente. Este balance se escribe como (Gaussorges, 1981):

$$S_{med} = \tau_a \varepsilon_m S_0(T_m) + \tau_a (1 - \varepsilon_m) S_0(T_{alr}) + (1 - \tau_a) S_0(T_a) \quad (2)$$

donde $S_0(T)$ es la señal producida por el sensor cuando incide radiación proveniente exclusivamente de un cuerpo negro a temperatura T , τ_a es la transmitancia efectiva de la atmósfera en el rango del detector, ε_m es la emisividad efectiva de la muestra en dicho rango, T_{alr} es la temperatura media radiante del entorno (K), T_a la temperatura del aire (K) y T_m la temperatura de la muestra (K).

Debido a que las cámaras cuentan en su interior con la expresión matemática de $S_0(T)$, a partir de la ecuación (2) obtienen T_m . Las cámaras en general almacenan la imagen termográfica como un archivo de datos radiométricos, es decir, almacenan los valores de S_{med} para cada pixel, valores a los que el usuario no tiene acceso. El software proporcionado por la cámara es capaz de calcular la temperatura correspondiente una vez ingresados los valores de ε_m , T_a y τ_a . Por esta razón, cuando el procesamiento de datos se hace a través del software de imágenes no es necesario que estos valores se incorporen al momento de la medida, sino que pueden luego modificarse en el mismo software.

En la ecuación (2) el último término puede despreciarse en caso de que el aire se considere transparente en la banda de longitudes de onda de funcionamiento del termógrafo, lo cual ocurre cuando el contenido de humedad del aire es bajo ($\tau_a = 1$). Si además en el entorno de la muestra no existen cuerpos con temperaturas muy diferentes a la del aire, se puede suponer que la temperatura radiante media del entorno T_{alr} es igual a la temperatura del aire T_a . En este caso, la ecuación anterior queda reducida a:

$$S_{med} = \varepsilon_m S_0(T_m) + (1 - \varepsilon_m) S_0(T_a) \quad (3)$$

MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA REFLECTANCIA INFRARROJA

Si se registra la imagen termográfica de una fuente opaca con emitancia ε_f , la señal que llega a la cámara proveniente de dicha fuente está formada por los dos términos de la ecuación 3, es decir, la señal incluye la radiación emitida por la fuente a temperatura T_f y la radiación del entorno a T_a reflejada por dicha fuente:

$$S_{med,f} = \varepsilon_f S_0(T_f) + (1 - \varepsilon_f) S_0(T_a) \quad (4)$$

Si a continuación se mira con suficiente rapidez la imagen termográfica del reflejo de esta misma fuente sobre una superficie especular de reflectancia ρ_m y emitancia ε_m (de ahora en más denominada *muestra*), entonces la señal recibida por la cámara incluye, de acuerdo a la ecuación (3), la radiación emitida por la muestra a temperatura T_a y la radiación reflejada por la misma proveniente de la fuente:

$$S_{med,r} = \varepsilon_m S_0(T_a) + \rho_m S_{med,f} \quad (5)$$

En este caso, la radiación del entorno está incluida en el segundo término de la ecuación (5). Como la muestra es especular, cualquier otra contribución del entorno proveniente de otros ángulos será reflejada en otras direcciones y no alcanzará el sensor. La Figura 1 muestra un esquema de la radiación que llega a la cámara luego de ser reflejada por una muestra opaca especular.

Entonces, la señal reflejada de acuerdo a las expresiones (4) y (5) se puede escribir como:

$$S_{med,r} = \varepsilon_m S_0(T_a) + \rho_m [\varepsilon_f S_0(T_f) + (1 - \varepsilon_f) S_0(T_a)]$$

Por otra parte, el termógrafo medirá para el reflejo de la fuente una temperatura aparente que estará dada por:

$$S_{med,r} = \varepsilon' S_0(T_r) + (1 - \varepsilon') S_0(T_a) \quad (7)$$

Donde es la ε' es la emitancia seteada en la cámara.

Igualando las expresiones (6) y (7) se obtiene la ecuación (8) para determinar la reflectancia IR de muestras especulares.

$$\rho_m = \frac{\varepsilon' [S_0(T_r) - S_0(T_a)]}{\varepsilon_f [S_0(T_f) - S_0(T_a)]} \quad (8)$$

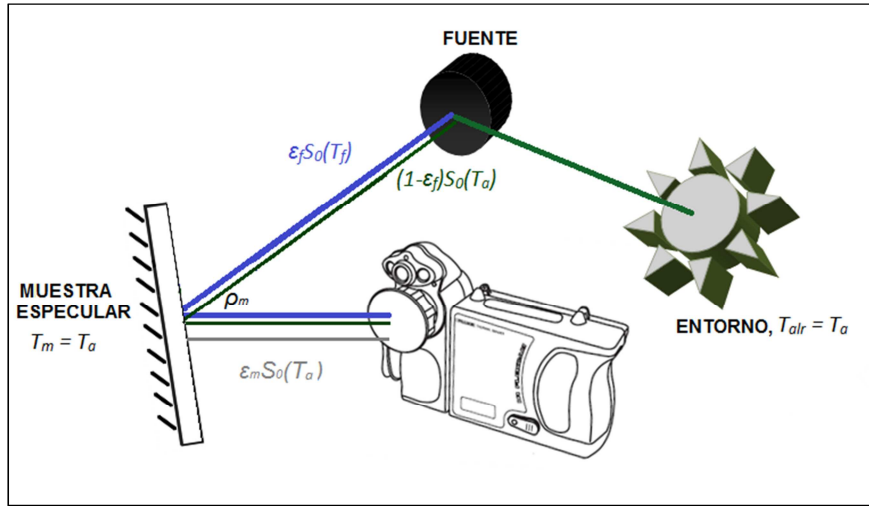


Figura 1: Esquema para la radiación que llega al detector mirando una muestra especular.

Si bien existen varias expresiones para $S_0(T)$, propuestas principalmente por Hakuma-Sattori, en este trabajo se utiliza la expresión potencial de la ecuación (9) donde C es una constante y $A = 4$ de manera tal de analizar los resultados de una expresión similar a la conocida ley de Stefan Boltzmann, siendo esta la más utilizada por la bibliografía consultada. Finalmente, ρ_m se determina a partir de la ecuación (10), reemplazando (9) en (8) y tomando $\varepsilon' = \varepsilon_f$. Esta última condición implica medir T_r con la emitancia establecida para medir T_f .

$$S_0(T) = CT^A \quad (9)$$

$$\rho_m = \frac{T_r^4 - T_a^4}{T_f^4 - T_a^4} \quad (10)$$

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con la finalidad de disponer de series de datos que representen la variación de la reflectancia ρ con el ángulo de incidencia θ se utilizó una cámara termográfica marca Fluke modelo Ti55. La cámara puede configurarse para medir en tres rangos de temperatura: entre -20 y 100°C, -20 a 350°C y 250 a 600°C, con una precisión de 2%. Las imágenes termográficas son analizadas mediante el software SmartView provisto por el fabricante.

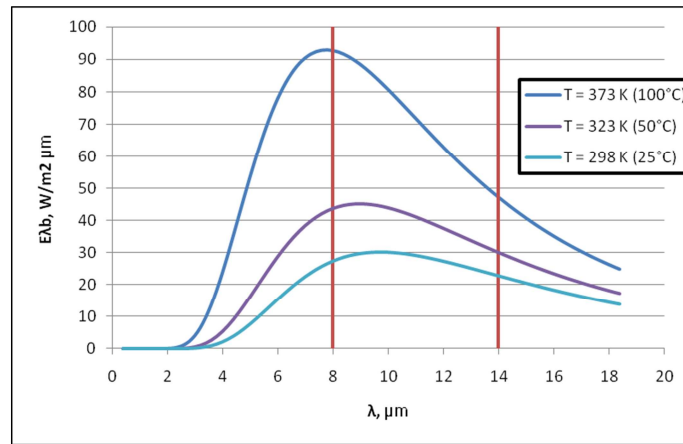


Figura 2. Distribución espectral para la radicación de un cuerpo negro a distintas temperaturas. Se observa el rango de detección de la cámara termográfica.

Como fuente de radiación se utilizó un calibrador de IR marca Hart Scientific modelo 9132, que permite contar con una superficie difusa circular de 57 mm de diámetro a temperatura uniforme y controlada. El uso de una fuente no puntual con una distribución uniforme de temperatura contribuye a obtener medidas de mayor calidad. Esta temperatura se puede variar entre 50° y 500°C. En las experiencias realizadas se trabajó con temperaturas entre 50°C y 100°C, las cuales permiten contar con niveles de radiación superiores a los producidos por el entorno, utilizar el primer rango de calibración del termógrafo (minimizando los errores de medida, del orden del 2%) y asegurar que la mayor cantidad de energía del espectro de emisión del cuerpo negro caiga dentro del rango de medida de la cámara (8 a 14 μm), figura 2. Para sensar la temperatura del aire del laboratorio se utilizó un termómetro marca Fluke modelo 54II.

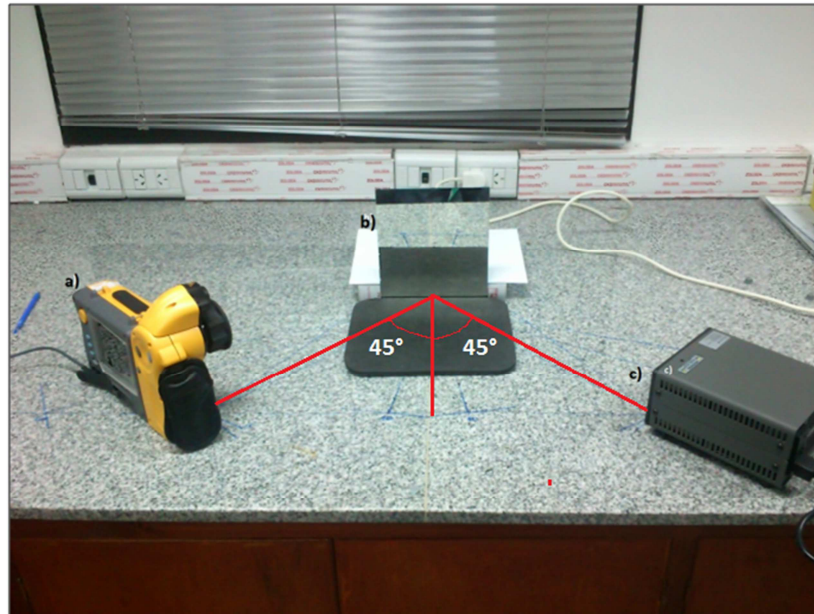


Figura 3. Se observan la cámara termográfica (a), muestra espejada (b) y fuente de temperatura (c), posicionados para realizar los ensayos a $\theta = 45^\circ$.

La metodología consiste en tomar imágenes termográficas de la fuente y de su reflejo en la superficie especular. Para minimizar los errores sistemáticos que puedan introducirse en las medidas, es importante tomar los siguientes recaudos: ajustar correctamente el foco de la cámara antes de tomar la imagen, que las superficies de las muestras a ensayar se encuentren limpias, mantener el lugar a una temperatura estable, evitar la presencia de otras fuentes a mayor temperatura y evitar corrientes de aire.

En primer lugar se setea la fuente para que alcance una temperatura determinada mayor que la temperatura ambiente y menor a 100°C y luego que ésta se estabiliza, se ubica la cámara enfrente a la fuente y se registra la imagen. Para setear los parámetros de la cámara se utilizan como temperatura de fondo la temperatura ambiente registrada por el termómetro y la emisividad provista por el fabricante de la fuente.

A continuación se coloca la muestra reflectante en el vértice principal de un triángulo isósceles como muestra la Figura 3. En la experiencia se realizaron medidas para $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ y 70° . De manera casi instantánea, para minimizar la absorción de calor por parte de la muestra y evitar su incremento de temperatura, se registra la imagen termográfica del reflejo del cuerpo emisor sobre la muestra reflectora (Figura 4).

Una vez obtenidas ambas imágenes, se determina mediante el software SmartView la temperatura de la fuente y del reflejo realizando un promedio a través de un perfil lineal de temperatura, como se aprecia en la Figura 5. En esta figura se observa que, debido a que la muestra es altamente especular, la imagen reflejada de la fuente no se distorsiona. Notar que si bien los colores de ambas imágenes son similares, en realidad las temperaturas que representan dependen de la escala utilizada, que se muestra a la derecha de cada imagen. Una vez determinadas las temperaturas de la fuente y del reflejo, se obtiene la reflectancia de la muestra mediante la ecuación (8).

Los materiales ensayados fueron:

- *espejos de diferentes espesores y calidades: espejo de 3mm de espesor con soporte de vidrio común, espejo de 4mm Belga con soporte de vidrio de calidad intermedia (menor contenido de hierro que el primero) y espejo con soporte de vidrio “blanco” (mínimo contenido de hierro).

- *vidrio común de 2mm de espesor

- *vidrio de 8mm Starphire

*acrílico

*muestra de aleación con 98.8% de Aluminio, el lado espejado de la muestra tiene un tratamiento de abrillantado y anodizado y el otro lado sólo anodizado. Esta muestra fue medida de ambas caras. (De ahora en más se la citará como *muestra de aluminio*).

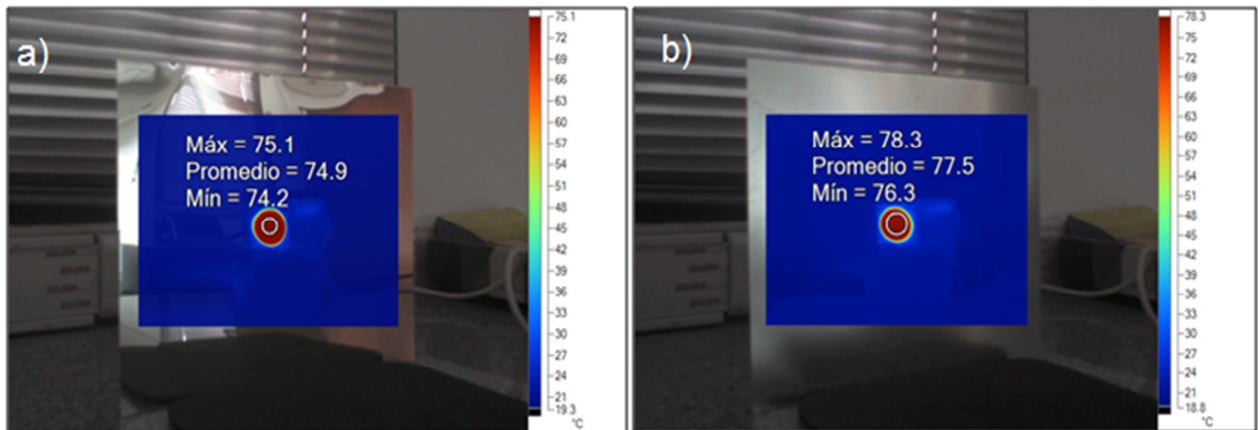


Figura 4. Termograma de una muestra de aluminio en donde se observa el reflejo de la fuente a 90°C. En a) la muestra se encuentra del lado pulido y en b) se encuentra colocada al revés.

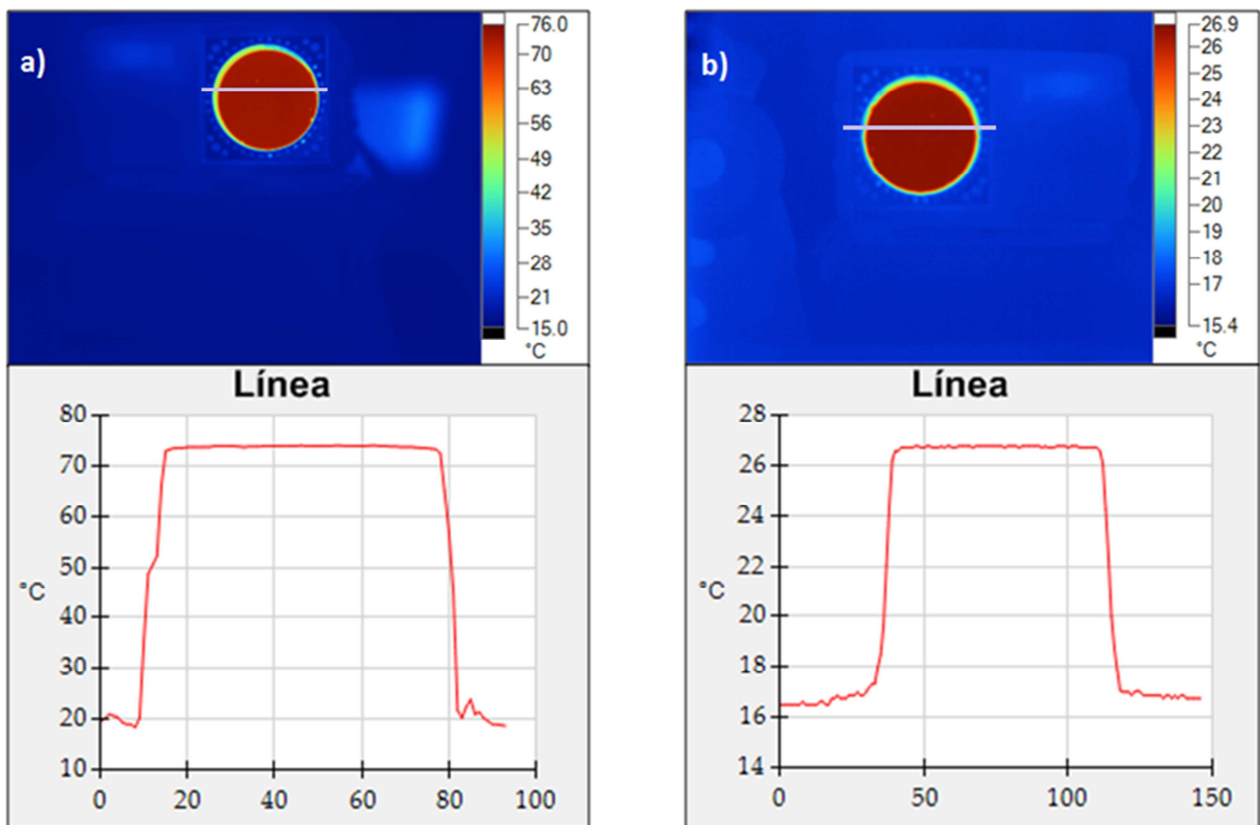


Figura 5. La imagen a) corresponde a la fuente, seteada en 75°C y la b) es la imagen del reflejo producido por una muestra espejada. Notar que las escalas de ambas imágenes son diferentes.

RESULTADOS

Los resultados se muestran en conjunto en la Figura 6. Se observa en primer lugar un comportamiento diferente entre el aluminio y las demás muestras que están compuestas por vidrio, para estas últimas la reflectancia ρ incrementa a medida que el ángulo de incidencia θ es mayor. En el caso del aluminio el comportamiento de ρ vs θ es inverso.

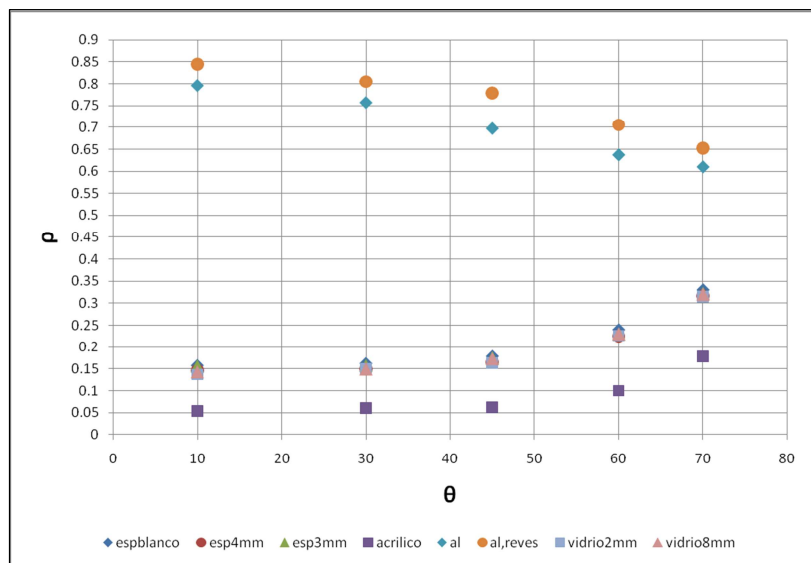


Figura 6. Resultados de ρ vs θ para todas las muestras ensayadas.

El aluminio al estar exento de una cubierta absorbente presenta valores de ρ altos, y como es de esperar, a medida que es mayor el ángulo de incidencia θ esta propiedad óptica presenta una disminución en sus valores. El lado pulido de este material presenta valores de ρ entre 0.8 y 0.6 aproximadamente, mientras que el lado no pulido (revés) presenta valores entre 0.85 y 0.65, valores entre un 6 y 8% mayores que los anteriores, esta diferencia se observa en la Figura 4 donde hay una diferencia de temperatura de 2.6°C, siendo mayor la temperatura del reflejo del caso b). Este comportamiento no era de esperarse, y su razón puede estar centrada en el tratamiento que recibe el material del lado espejado, orientado a ser altamente reflectante a la luz visible. También, el lado no pulido del material se encuentra al descubierto por lo que puede contener una película de suciedad que modifique su emisividad. Otra característica que podría influir en este resultado es que esta cara del metal es menos especular que su contraparte, por lo que la radiación reflejada por una zona podría contener una pequeña contribución adicional de puntos adyacentes que aumentaría los valores de ρ .

Al ser una lámina delgada de aluminio la superficie no se encuentra totalmente plana, es por ello que en la Figura 3 el reflejo no es perfectamente una forma circular. Este inconveniente no afecta significativamente la medida, puede introducir errores de hasta 0.5°C en las temperaturas registradas y como consecuencia una variación de hasta 1% en el valor de ρ obtenido.

Las tres muestras espejadas y las dos muestras de vidrio describen comportamientos análogos, con valores prácticamente superpuestos. Se observan leves discrepancias entre un 5 y 10% entre valores máximos y mínimos (espejo de vidrio blanco y vidrio de 2mm respectivamente). Estos resultados expresan que la reflectancia en el rango infrarrojo depende débilmente del tipo de vidrio y de su espesor.

Los valores de reflectancia medidos para la muestra de acrílico presentan una distribución similar a la de las muestras compuestas por vidrio, aunque son menores que estos últimos en un 40 a 65%, debido a su mayor capacidad de absorción de IR. Este material presenta valores de ρ entre 0.05 y 0.18.

En el rango IR, la variación de la reflectancia con el ángulo de incidencia es diferente para materiales que estén compuestos por vidrio que para materiales que no lo están, como el aluminio. Los comportamientos y valores desiguales se deben a la alta absorción del vidrio en este rango. La mayoría de los vidrios son opacos a la radiación infrarroja con longitud de onda mayor a 4 μm , por lo que la reflexión se da en una sola interface (aire), en consecuencia la curva ρ vs λ será la misma para una hoja delgada de vidrio que para una o varias cubiertas de vidrio (Krenzinger y de Andrade, 2007). Esto implica que la transmitancia del vidrio es nula por lo que la radiación incidente debe ser absorbida o reflejada. Lo que se observa en las medidas realizadas es que la reflectancia tiende a aumentar mientras mayor sea el ángulo con el que incide la radiación, por lo que $\alpha = 1 - \rho$ presenta el comportamiento inverso. Este comportamiento detectado en el infrarrojo es diferente al del visible, en el cual debido a que la absorción tiene valores pequeños, la reflectancia efectiva es una combinación de los coeficientes de reflexión de dos o más interfaces (en el caso de las interfaces aire-vidrio-aire).

Tanto las tres muestras espejadas como las dos muestras de vidrio alcanzan valores similares de ρ , desde 0.15 hasta 0.32 aproximadamente. De este conjunto, la muestra de espejo con soporte de vidrio "blanco" de 4mm de espesor presentó los mayores valores de reflectancia para cada punto de medida.

Si bien los ensayos se realizaron durante varios días, los datos representados corresponden al último día de medida. La repetibilidad de los mismos puede considerarse aceptable, en el peor de los casos se observan diferencias de 1.4% entre medidas realizadas en distintos días.

CONCLUSIONES

En el rango IR, la variación de la reflectancia con el ángulo de incidencia es diferente para materiales que estén compuestos por vidrio que para materiales que no lo están como el aluminio. A incidencia prácticamente normal ($\theta = 10^\circ$) el aluminio pulido presenta una reflectancia de ~ 0.80 . Para el caso de los espejos, la reflectancia oscila entre 0.15 y 0.16, de acuerdo a la calidad de vidrio y para vidrios sin espejar la reflectancia es de 0.14. El espejo con soporte de vidrio “blanco” de 4 mm de espesor tiene un ρ de ~ 0.16 , el de vidrio Belga de 4 mm presentó un valor de ~ 0.15 y el de vidrio común de 3 mm una reflectancia de ~ 0.16 . Para el grupo de muestras de vidrio sin espejar, la reflectancia medida fue de ~ 0.14 tanto para el vidrio de 2 mm de espesor como para la muestra de vidrio Starphire de 8 mm de espesor. El valor teórico para un vidrio común con índice de refracción $n = 2.25$ es $\rho = 0.15$ para incidencia a 10° .

El método de medición se llevó a cabo sin grandes dificultades y permitió describir de manera aceptable el comportamiento de esta propiedad óptica para el rango infrarrojo lejano y para distintos ángulos de incidencia. Es importante resaltar que el método es válido sólo para muestras cuyas superficies sean lisas (reflexión especular). Se prevé extender el método para mediciones de muestras no especulares, siguiendo una metodología análoga y realizando pequeñas modificaciones en las ecuaciones que representan a ρ en función de las temperaturas medidas.

En el futuro se prevé caracterizar la reflectancia de las muestras para rangos de longitudes de onda menores, principalmente para el rango visible, mediante el uso de espectroradiómetros. Se dispone de los instrumentos necesarios para ensayar bajo condiciones de laboratorio ya se dispone de una fuente con lámparas de tungsteno y deuterio que simulan la energía proveniente del sol, y también de los espectros radiómetros correspondientes para realizar los ensayos. Esto permitiría caracterizar de manera completa el comportamiento de la propiedad ρ para distintos materiales con alto grado de especularidad.

BIBLIOGRAFIA

- Albatici R., Tonelli A., (2009). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, volume 42, page 2177-2183.
- Barreira E., de Freitas, V.P. (2007). Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials* 21, pp. 218–224.
- Duffie J., Beckman W. (2005). *Solar Engineering of Thermal Processes*, Third Edition, John Wiley and Sons.
- Gaussorgues G., (1989). *La thermographie infrarouge*. Troisième édition. Technique et Documentation, Lavoisier. Paris.
- Grinzato E., Vavilov V., Kauppinen T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings* 29, pp. 1-9.
- Krenzinger A., de Andrade A.C., (2007). Accurate outdoor glass thermographic thermometry applied to solar energy devices. *Solar Energy*, volumen 81, page 1025-1034.
- Rogalski A. (2011). Recent progress in infrared detector technologies, *Infrared Physics & Technology* 54, pp. 136–154.
- SolarPACES (2011). Guideline. Measurement of solar weighted reflectance of mirror materials for concentrating solar power technology with commercially available instrumentation. http://www.solarpaces.org/Tasks/Task3/Reflectance_Guideline.pdf.

ABSTRACT

This work presents an experimental methodology to measure the specular reflectance in the far IR range, by using a thermographic camera. Measurements were performed for specular targets of two different types: with glass support and for metallic reflectors. Mirrors of different thicknesses and qualities of glass, clear glasses, acrylic and an aluminum plate were studied. For these materials the infrared reflectance was determined for different incident angles (10° , 30° , 45° , 60° and 70°). The results indicate that the aluminum target presents the highest values of reflectance (0.80 at normal incidence), which decreases as the angle of incidence becomes higher. The five samples that contains glass have similar reflectance values (0.15 at normal incidence), which increase with the incidence angle.

Keywords: thermographic camera, specular reflection, thermograms.